

- И.Л. Повх. – М. : Metallurgiya, 1974. – 495 с.
7. Казанцев И.Г. Механика газовой струи в бессемеровской ванне / И.Г. Казанцев // Сталь. – 1940. – №1. – С. 16-18.
 8. Марков Б.Л. О внедрении газовой струи в жидкость / Б.Л. Марков, А.А. Кирсанов // Черная металлургия. – 1970. – №8. – С. 42-47.

Bibliography:

1. Baptizmansky V.I. Theory oxygen converter process / V.I. Baptizmansky. – M. : Metallurgiya, 1975. – 376 p. (Rus.)
2. Aldoshin G.T. The study of hydrodynamic and thermal interaction of gas jets with liquids and disperse media / G.T. Aldoshin // Heat and the mass transfer. – Vol. 1. – 1972. – P. 287-296. (Rus.)
3. Koval V.P. Mathematical modeling of fluid motion in axisymmetric bath under the action the injected jet / V.P. Koval, A.V. Potapov // Journal of Engineering Physics. – 1977. – V. 32. – P. 443-448. (Rus.)
4. Gorbunov K.S. Analytical solution of the dynamical interaction of the gas jet with an incompressible fluid / K.S. Gorbunov // Mathematical and economic models in operations management. – M. : Electrical. – 1998. – №8. – P. 32-33. (Rus.)
5. Kazantsev I.G. Investigation of the dynamics of the gaseous jets tiring into liquid // Heat and plastic treatment of metals: Collection of scientific works / ZHDMI. – Kharkiv, 1952. – Issue 2. – P. 56-59. (Rus.)
6. Yavoysky V.I. Theory of a purge of a steel-smelting bathtub / V.I. Yavoysky, G.A. Drofeev, I.L. Povkh. – M. : Metallurgiya, 1974. – 495 p. (Rus.)
7. Kazantsev I.G. The mechanics of the gas jet in Bessemer bath // Steel. – 1940. – №1. – P. 16-18. (Rus.)
8. Markov B.L. On the implementation of the gas jet in liquid / B.L. Markov, A.A. Kirsanov // Ferrous metallurgy. – 1970. – №8. – P. 42-47. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 18.02.2015

УДК 669.146

© Чичкарев Е.А.¹, Цюцюра А.В.², Алексеева В.А.³, Чичкарев К.Е.⁴

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАСКИСЛЕНИЯ И ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ НИЗКОКРЕМНИСТЫХ МАРОК СТАЛИ

Проанализированы условия раскисления и внепечной обработки низкремнистой стали. Установлен рост размаха варьирования активности кислорода в конвертере перед выпуском по мере уменьшения массовой доли углерода в металле. Проанализировано влияние науглероживания плавки на расход и степень усвоения алюминия. Показано, что при выплавке низкремнистых марок стали с внепечной обработкой без использования установки ковш-печь рациональные пределы варьирования массовой доли оксида магния в ковшевом шлаке – 6-8% масс.

Ключевые слова: низкремнистая сталь; неметаллические включения; внепечная обработка; установка ковш-печь.

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, influence@meta.ua

² начальник конвертерной лаборатории, ПАО «ММК им. Ильича», г. Мариуполь, cos_donbass@mail.ru

³ ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, ave-ni@list.ru

⁴ инженер, ПАО «ММК им. Ильича», г. Мариуполь, cos_donbass@mail.ru

Чичкар'єв Є.А., Цюцюра О.В., Алексєєва В.А., Чичкар'єв К.Є. Термодинамічний аналіз умов розкиснення та позапічної обробки низькокрем'янистих марок сталі. Проаналізовані умови розкиснення та позапічної обробки низькокрем'янистої сталі. Встановлено зростання розмаху варіювання активності кисню в конвертері перед випуском по мірі зменшення масової долі вуглецю в металі. Проаналізований вплив на вуглецювання плавки на витрату та міру засвоєння алюмінію. Показано, що при виплавці низькокрем'янистих марок сталі з позапічною обробкою без використання установки ківш-піч раціональні межі варіювання масової долі оксиду магнію в ківшовому шлаку – 6-8% мас.

Ключові слова: низькокрем'яниста сталь; неметалеві включення; позапічна обробка; установка ківш-піч.

E.A. Chichkarev, O.V. Tsyutsyura, V.A. Alekseeva, K.E. Chichkarev. Thermodynamic analysis of the conditions of deoxidation and secondary treatment of low-silicon steel grade. This article is concerned with analysis and production testing of technological solutions aimed at reducing the consumption of aluminium for steel deoxidation and reducing level of metal contamination by oxide non-metal inclusions, as well as preventing silicon reduction during out-of-furnace treatment. The conditions of low-silicon steel deoxidation and out-of-furnace treatment have been analysed. It has been found that the scope of oxygen activity variation in the converter before tapping increases while the mass fraction of carbon in the metal decreases. For the converter meltings with a mass fraction of carbon over the range 0,05-0,07 % [C] before tapping the real range of variation was 150-300 ppm. The effect of meltings carburizing on aluminium consumption and the degree of aluminium assimilation have been analysed. It has been shown that in fact the same specific consumption of ferromanganese and comparable changes within the metal oxidation change range before tapping (400-1100 ppm) the addition of the carburizer decreases the consumption of aluminium by 0,15 kg/t (in amounts of pure aluminium). The variation interval of assimilation degree of aluminium, consumed for binding the dissolved oxygen in metal and for dissolution in metal has been found. It has been shown that in the melting of low-silicon steel with out-of-furnace treatment but without the use of furnace-ladle unit the rational limit of variation of mass fraction of magnesium oxide variation in the ladle slag is equal to- 6-8 % by weight.

Keywords: low-silicon steel, non-metallic inclusions, secondary treatment, ladle furnace.

Постановка проблеми. В последнее десятилетие значительную долю в сортаменте производства современных металлургических предприятий занимают низкоуглеродистые стали, обладающие высокой пластичностью и хорошей свариваемостью.

При выплавке низкоуглеродистой стали, раскисненной алюминием (LCAK в английской транскрипции), характерным дефектом являются мелкие полосы и плёны на поверхности тонколистового проката (т.н. «slivers»). Одна из причин формирования этих дефектов – наличие неоднородностей, связанных с оксидными неметаллическими включениями (скопления частиц корунд или комплексные оксиды) [1, 2].

Анализ последних исследований и публикаций. По мнению [2], к снижению вероятности формирования дефектов, связанных с неметаллическими включениями, ведёт снижение активности растворённого кислорода до величин менее 750 ppm и, как следствие, снижение расхода алюминия на раскисление и количества образующихся кластеров корунда.

При выплавке стали в кислородном конверторе низкоуглеродистый полупродукт (менее 0,07 % C) содержит значительное количество растворенного кислорода. При одинаковой массовой доле углерода активность растворенного кислорода существенно меняется, что ведёт к существенным колебаниям степени усвоения легирующих присадок и раскислителей.

Цель статьи. Настоящая работа посвящена анализу и промышленной проверке технологических решений, направленных на сокращение потребления алюминия на раскисление стали и снижение уровня загрязнённости металла оксидными неметаллическими включениями, а также направленных на предотвращение восстановления кремния из шлака при внепечной обработке.

Изложение основного материала. В данной работе при выплавке малоуглеродистых марок стали, для снижения окисленности металла в ходе выпуска из 160-т конвертера или крупнотоннажной мартеновской печи (900-т), использовались углеродсодержащие материалы – термоантрацит или карбид кальция, которые присаживались на струю металла в начале выпуска плавки. Окисленность металла определяли перед сливом металла из конвертера, при помощи прибора Multi-Lab с использованием зонда Celox.

Экспериментальное исследование активности кислорода перед выпуском плавки из конвертера проводилось в условиях конвертерных цехов МК им. Ильича (160-т конвертер). Измерение активности проводилось непосредственно после отбора проб при помощи датчиков Celox, результаты регистрировались при помощи микропроцессорного блока Celox.

При анализе влияния массовой доли углерода и температуры металла перед выпуском на активность кислорода установлено, что последняя заметно увеличивается как с ростом температуры, так и по мере уменьшения массовой доли углерода. Основные результаты представлены на рис. 1. Общий объем первичных данных для обработки свыше 500 плавков различных марок стали.

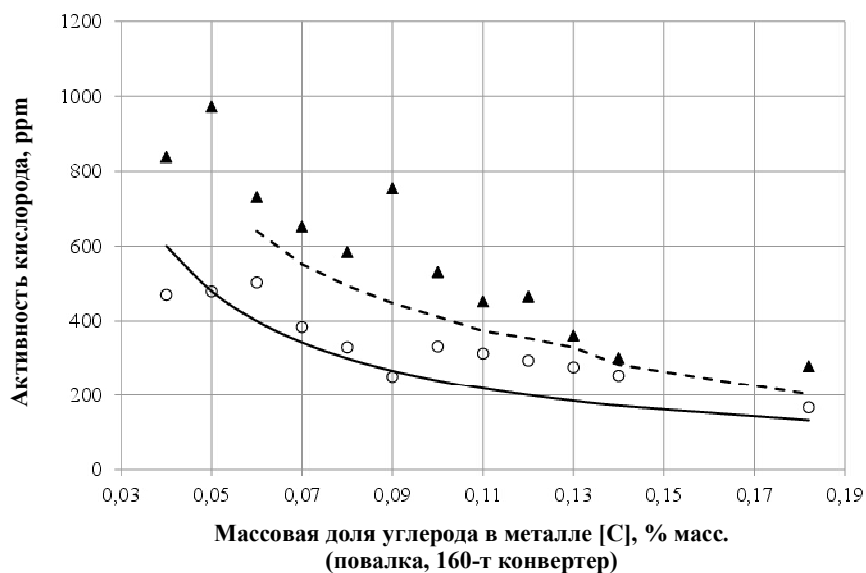


Рис. 1 – Пределы варьирования активности кислорода на выпуске плавки из 160-т конвертера: - - - среднее значение; ○ – минимальное; ▲ – максимальное; — – равновесное

Как видно из рис. 1, активность растворенного в стали кислорода быстро растет по мере снижения массовой доли углерода. Помимо хорошо известного явления роста фактической и равновесной активности кислорода, растворенного в металле, по мере снижения массовой доли углерода перед выпуском, при обработке результатов проведения опытных плавков низкоуглеродистых марок стали отмечен и рост размаха варьирования фактических значений активности кислорода.

Этот эффект вызван резким ростом влияния массовой доли углерода на активность кислорода по мере уменьшения массовой доли углерода (особенно при $[C] < 0,07\%$).

Фактически наблюдаемый интервал варьирования $a_{[O]}$ в зависимости от массовой доли углерода на повалке конвертера представлен на рис. 2.

Погрешность определения и представления величины массовой доли углерода при выплавке низкоуглеродистых марок стали составляла 0,005-0,010 %, что соответствует вариации активности кислорода

$$\Delta a_{[O]} = \frac{K_C}{[C]^2} \cdot \Delta [C] \cdot 10000, \quad ppm. \quad (1)$$

В соответствии с уравнением (1) интервал варьирования активности кислорода составля-

ет 50-100 ppm/0,01 % [C] (для массовой доли углерода 0,05-0,07 % [C]), однако фактический интервал варьирования в 2-3 раза шире (150-300 ppm, см. рис. 2).

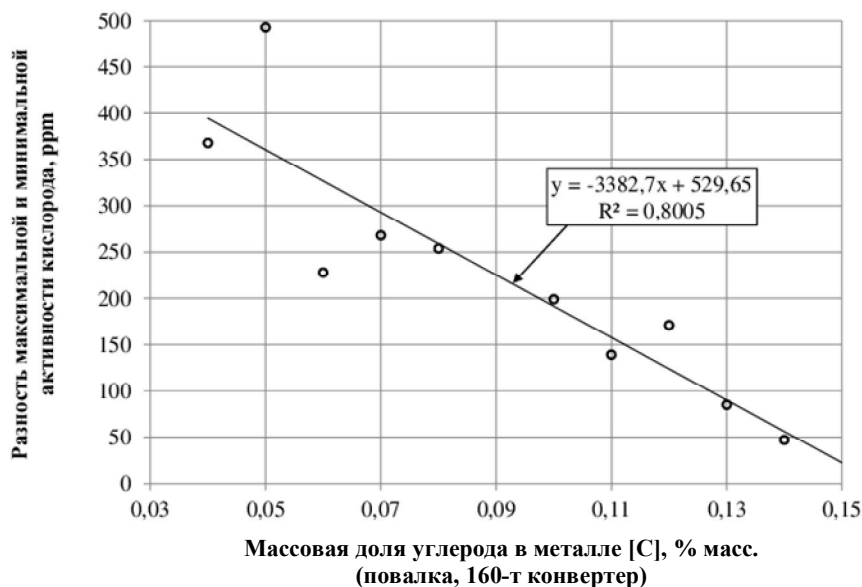


Рис. 2 – Размах вариации активности кислорода в стали по завершении продувки

На основании анализа изменения окисленности металла в зависимости от технологических параметров выплавки (160-т конвертер, наблюдение в течение четырёх месяцев работы цеха) установлено, что по мере роста массовой доли углерода перед выпуском разность между максимальным и минимальным значениями активности кислорода уменьшается от примерно 900 ppm (470-1370 ppm) при массовой доле углерода 0,03-0,04% до 100 ppm при массовой доле углерода свыше 0,1 %. Однако, около 70 % плавов даже при выплавке среднеуглеродистых марок стали выпускаются с массовой долей углерода менее 0,09 %. Поэтому расчёт величины присадки алюминия по величине активности растворенного кислорода при выплавке низкоуглеродистых марок стали является предпочтительным.

С целью снижения расхода и угара раскислителей и ферросплавов, а также снижения и стабилизации окисленности, улучшения качества стали и уменьшения ее себестоимости используется предварительное раскисление расплава в конвертере или сталеразливочном ковше. Одним из таких способов снятия переокисленности является предварительное раскисление стали углеродсодержащими материалами [3, 4].

При расчёте необходимого расхода алюминия для раскисления стали на выпуске из конвертера предполагалось, что последний расходуется на, собственно, раскисление металла (т.е. связывание растворенного кислорода), растворение в металле и прочие статьи расхода (восстановление шлака, окисление кислородом воздуха и т.п.), то есть:

$$g_{Al} = G_{Al, \text{раскисление}} + G_{Al, \text{растворение}} + G_{Al, \text{проч. статьи}} \quad (2)$$

Для расчета использовалась следующая формула [3]:

$$g_{Al} = \left(\frac{A + B \cdot T}{100} + \frac{(a_{[O]} - a_{[O]}^{цель}) \cdot 100}{10000 \cdot 100 \cdot \eta_1} \cdot \frac{2 \cdot 27}{3 \cdot 16} + \frac{([Al]_{цель} - [Al]_{нач})}{\eta_2} \right) \cdot G_{металла} \cdot 1000, \quad (3)$$

где η_1, η_2 – степень усвоения алюминия на этапах раскисления и растворения в металле соответственно; $a_{[O]}, a_{[O]}^{цель}$ – активность кислорода в металле по результатам измерения и заданная соответственно (для спокойных марок стали $a_{[O]}^{цель} = 0,0$); $[Al]_{цель}, [Al]_{нач}$ – заданная концентрация алюминия в металле и концентрация после раскисления (на данной стадии исследования можно принять $[Al]_{нач} = 0$); $g_{Al}, G_{металла}$ – необходимая масса алюминия и масса ме-

талла в ковше соответственно; A , B – эмпирические параметры.

Как показали предварительные исследования, величина η_1 варьируется в пределах 85 – 95 %, величина η_2 , в зависимости от вида применяемого алюминиевого раскислителя и расхода других раскислителей и легирующих присадок, меняется в пределах 40 – 60%.

Однако использование углеродсодержащих материалов для регулирования окисленности металла ограничено возможностью его науглероживания. При достаточно высокой окисленности металла условная степень углерода отрицательна, т.е. за счёт растворённого в металле кислорода окисляется не только углерод присадки, но и часть растворённого углерода.

Влияние присадок углерода на степень усвоения алюминия при раскислении конвертерной стали на выпуске иллюстрирует рис. 3 (требования по химическому составу сопоставляемых марок стали приведены в таблице). Остаточный алюминий $[Al]_{ост}$ рассчитывался как разность присадки алюминия, пересчитанной в % масс., и расхода алюминия на связывание растворённого кислорода (с учетом степени усвоения $\eta_1 = 90$ %), $[Al]_1$ – массовая доля алюминия в металле перед началом доводки. Как видно из рисунка, при фактически одинаковом удельном расходе ферромарганца и сопоставимых пределах изменения окисленности металла перед выпуском (400 – 1100 ppm) присадка науглероживателя приводит к снижению расхода алюминия около 0,15 кг/т (в пересчёте на чистый алюминий).

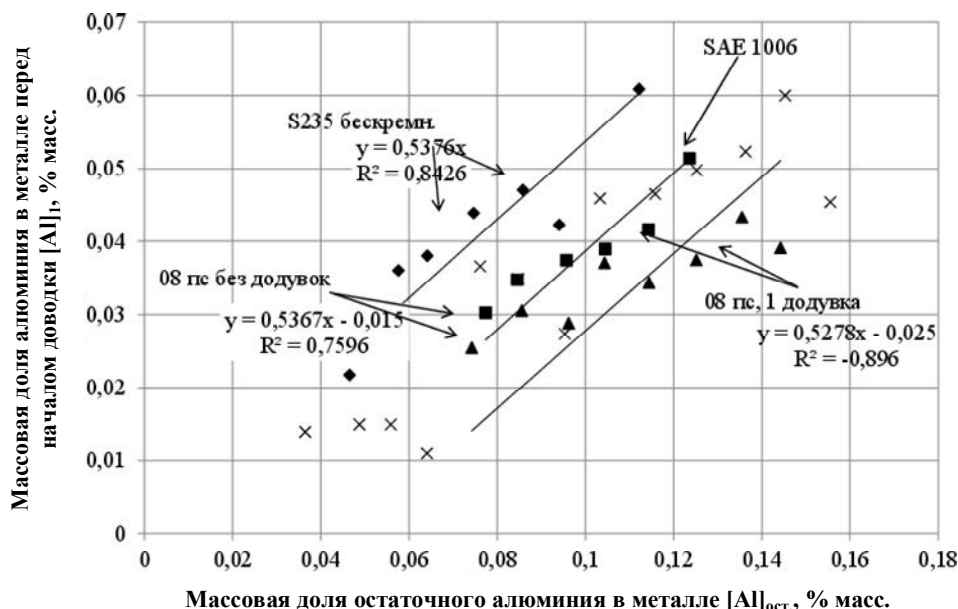


Рис. 3 – Оценка влияния науглероживания и додувки на усвоение алюминия при раскислении на выпуске (бескремнистые марки стали)

Таблица

Основные требования к химическому составу исследованных марок стали

| Марка стали | Массовая доля элементов, % масс. | | |
|------------------|----------------------------------|-------------|---------|
| | C | Mn | Si |
| 08пс (ГОСТ 4041) | 0,06 – 0,09 | 0,25 – 0,40 | до 0,04 |
| S235 | 0,12 – 0,16 | 0,30 – 0,60 | до 0,03 |
| SAE 1006 | до 0,08 | 0,25 – 0,40 | до 0,03 |

Сопоставление фактического расхода алюминия на раскисления для двух выборок стали (S235 – с присадкой углерода на выпуске и SAE 1006 – без присадки) приведено на рис. 3. Масса присаживаемого чушкового алюминия определялась по уравнению (3) из расчёта получения массовой доли алюминия в пробе перед началом доводки, равной 0,03 – 0,04 % масс.

Как видно из рис. 3, при додувке плавки при одном и том же количестве остаточного

алюминия заметно уменьшается его массовая доля в пробе, отобранной на агрегате доводки стали (что соответствует увеличению параметра A в уравнении (3)). Присадка небольшого количества углеродсодержащего материала в зависимости от окисленности металла при выплавке малоуглеродистой стали, с расходом, зависящим от окисленности, также позволяет заметно снизить окисленность металла на выпуске из конвертера, и для сталей SAE 1006 или 08пс получить практически такую же зависимость удельного расхода алюминия от окисленности металла, как и для стали S235 (рис. 4).

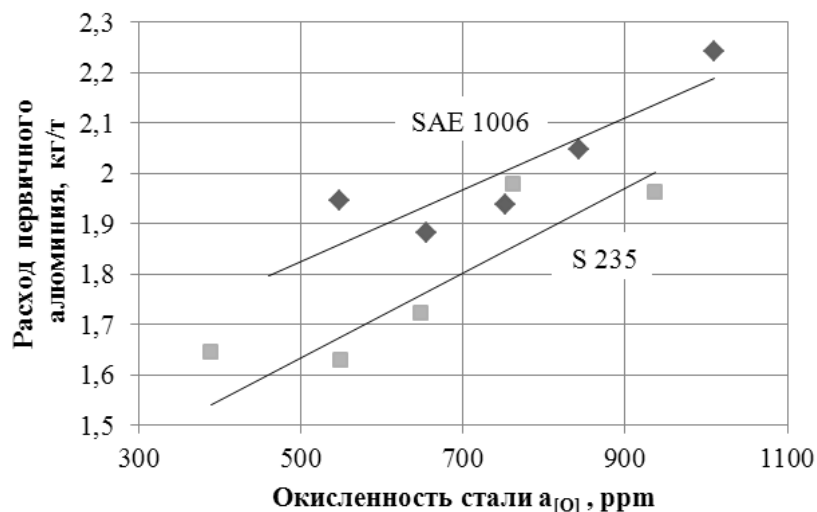
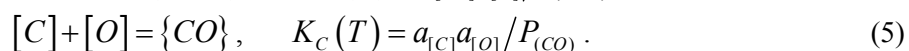
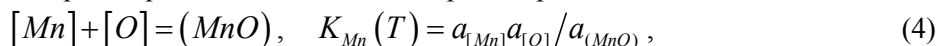


Рис. 4 – Сравнение фактического расхода алюминия на раскисление стали марок S235 и SAE 1006 (1 плавка – среднее по 10 – 15 плавкам с близкими значениями активности растворенного кислорода)

При выпуске в ковш и раскислении стали одним ферромарганцем, как углерод, так и марганец способны связывать растворенный в металле кислород по реакциям:



При температурах сталеплавильного производства в ковше обычно достигается соотношение констант равновесия $K_{Mn}/K_C = 4...8$, близкое к равновесному соотношению концентрация марганца и углерода в металле после раскисления. В соответствии с равновесиями (4) и (5) отношение концентраций марганца и углерода постоянно и зависит преимущественно от температуры

$$\frac{a_{[Mn]}}{a_{[C]}} \approx \frac{[Mn]}{[C]} = \frac{K_{Mn}(T) \cdot a_{(MnO)}}{K_C(T) \cdot P_{CO}}. \quad (6)$$

Так как до присадки алюминия $a_{(MnO)} \approx 1$ и $P_{CO} \approx 1 \text{ атм}$, приближенно $[Mn]/[C] = K_{Mn}(T)/K_C(T)$. При добавке марганца больше, чем необходимо из соотношения (6), в первую очередь окисляется марганец, иначе – окисляется углерод. При реальных температурах выпуска конвертерной стали окисляться в ковше и связывать избыточный кислород будет в первую очередь углерод.

Для определения содержания углерода в стали низкоуглеродистых марок по результатам измерений окисленности (вообще говоря, неравновесного) использовалось специфическое для условий конкретного цеха уравнение вида:

$$\ln[C] = a_0 + \frac{a_1}{T} + a_2 \cdot \ln(a_{[O]}), \quad (7)$$

где a_0, a_1, a_2 – эмпирические коэффициенты.

Для широкого круга марок стали, в которых содержание углерода в металле перед выпуском до 0,15 %, точность этого соотношения недостаточна вследствие широкого интервала варьирования окисленности металла, поэтому целесообразно использовать более сложную зависимость:

$$\ln[C] = a_0 + \frac{a_1}{T} + a_2 \cdot \ln(a_{[O]}) + a_3 \cdot \ln^2(a_{[O]}), \quad (8)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – эмпирические коэффициенты.

В частности, по результатам статистического анализа по серии опытных плавов различных марок стали была установлена следующая зависимость (коэффициент корреляции $R^2 = 0,72$, на повалке 160-т конвертера):

$$\ln[C] = -0,5456 - 0,0440 \cdot \ln\left(\frac{a_{[O]}}{10000}\right) - \frac{6709,61}{T} + 0,1353 \cdot \left(\ln\left(\frac{a_{[O]}}{10000}\right)\right)^2. \quad (9)$$

Как показало промышленное опробование технологии раскисления стали с использованием данных о прямом измерении активности кислорода, при отсутствии надёжно работающей отсечки конвертерного шлака результаты оценки степени усвоения для различных групп марок стали могут заметно различаться.

Использование технологии раскисления спокойных марок стали с использованием данных об окисленности металла и её регулирования перед и в ходе выпуска плавки позволяет достичь существенной экономии алюминиевой катанки, расходуемой на доводку плавов, а также снизить уровень загрязнённости проката из конвертерного и мартеновского стали окисными неметаллическими включениями.

Технология раскисления стали на выпуске из сталеплавильного агрегата оказывает существенное влияние на изменение массовой доли кремния в стали. В частности, при выплавке стали 08пс и SAE1006 установлено, что прирост массовой доли кремния коррелирует с массовой долей алюминия перед началом внепечной обработки (рис. 5). Различие массовых долей кремния в сталях 08пс и SAE1006 объясняется присадками различных марганцевых ферросплавов (08пс – ферромарганца, SAE1006 – металлического марганца).

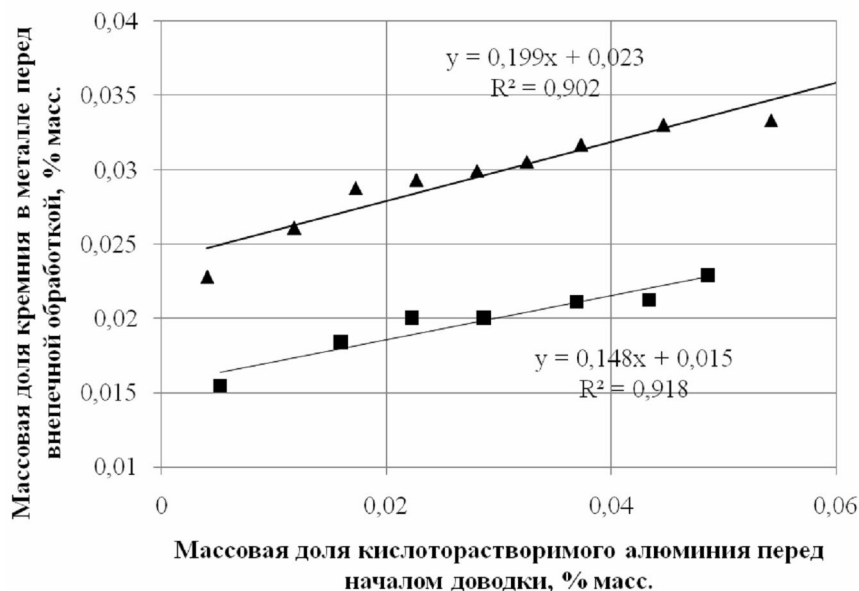


Рис. 5 – Изменение массовой доли кремния в готовом металле в зависимости от условий раскисления: ▲ – 08пс; ■ – SAE1006

Для предварительного раскисления низкоуглеродистой стали, раскисленной алюминием, используют также сплавы кремния, которые присаживаются из расчёта достижения массовой доли кремния до 0,01 %, и окончательное раскисление алюминием в ходе внепечной обработки [5].

Однако при введении больших масс алюминия, особенно локально, возникают условия для восстановления кремния из сформировавшихся на предыдущей стадии обработки стали включений кремнезема и покровного шлака, что подтверждается как снижением количества включений SiO_2 , так и ростом содержания кремния в стали.

По данным [5] возможными причинами отсортировки по дефектам, относимым к НВ, являются пониженное отношение $[\text{Mn}]:[\text{S}]$ и/или повышенное содержание в металле НВ из-за высокой окисленности полупродукта при выпуске из конвертера. Рост уровня отсортировки листового проката по дефектам «рваная кромка» (мартеновская сталь) или «надрыв» (конвертерная сталь) по мере снижения отношения $[\text{Mn}]:[\text{S}]$ отмечен и в условиях ПАО ММК им. Ильича.

Однако десульфурация низкокремнистой стали на выпуске или во время внепечной обработки может быть сопряжена с серьёзными трудностями, связанными с проблемой восстановления кремния из шлака при недостаточной основности или глубоком раскислении последнего.

Возможность восстановления кремния из шлака (применительно к конвертерной стали) проанализирована путем анализа равновесия



Для расчёта активности кремнезёма и оксида алюминия в шлаке использована модель [6, 7] с учётом более новых данных [8].

Контроль активности кислорода в стали по ходу внепечной обработки показал, что равновесная активность оксида алюминия в неметаллических включениях близка к 1. Однако при этом массовая доля кремния в металле несколько ниже равновесной со шлаком, но меняется в соответствии с массовыми долями кремнезёма в шлаке и кислоторастворимого алюминия в металле.

Результаты расчёта показали (рис. 6), что увеличение массовой доли MgO в ковшевом шлаке ведёт к заметному снижению активности кремнезёма, что подтверждается и результатами промышленного эксперимента (рис. 7).

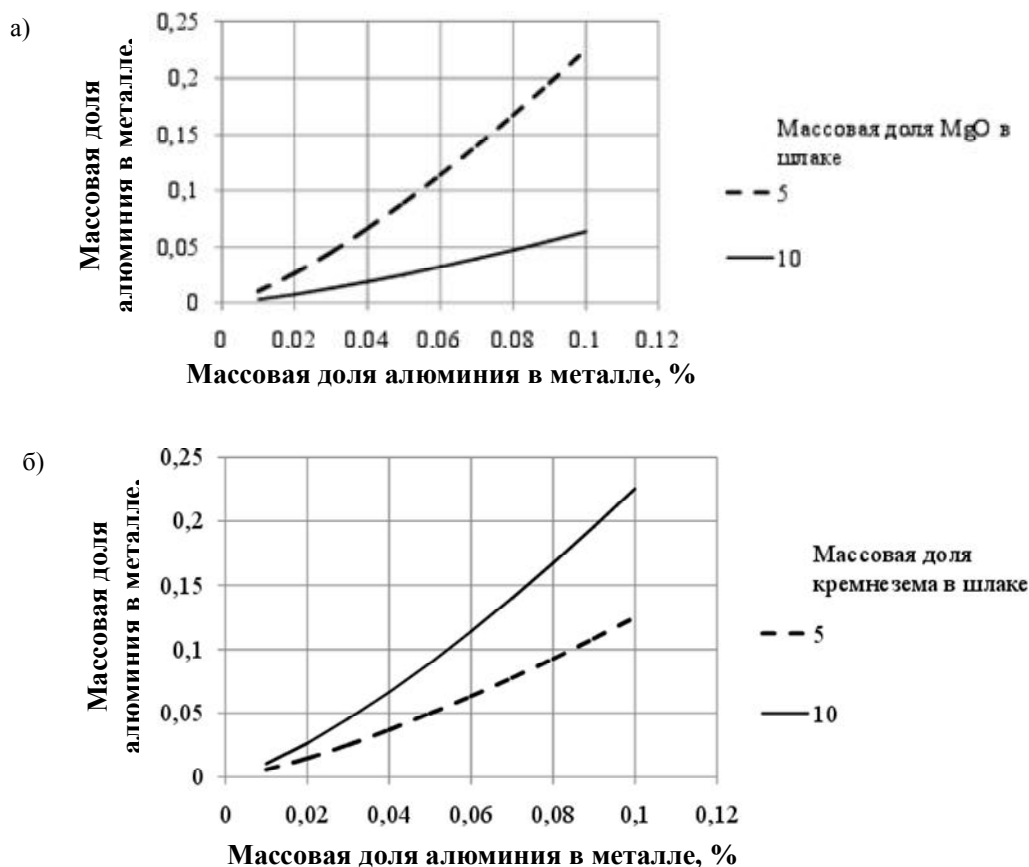


Рис. 6 – Равновесная со шлаком массовая доля кремния в металле в зависимости от массовой доли алюминия: а – влияние массовой доли оксида магния в шлаке (5 % кремнезёма); б – влияние массовой доли кремнезёма в шлаке (5 % MgO)

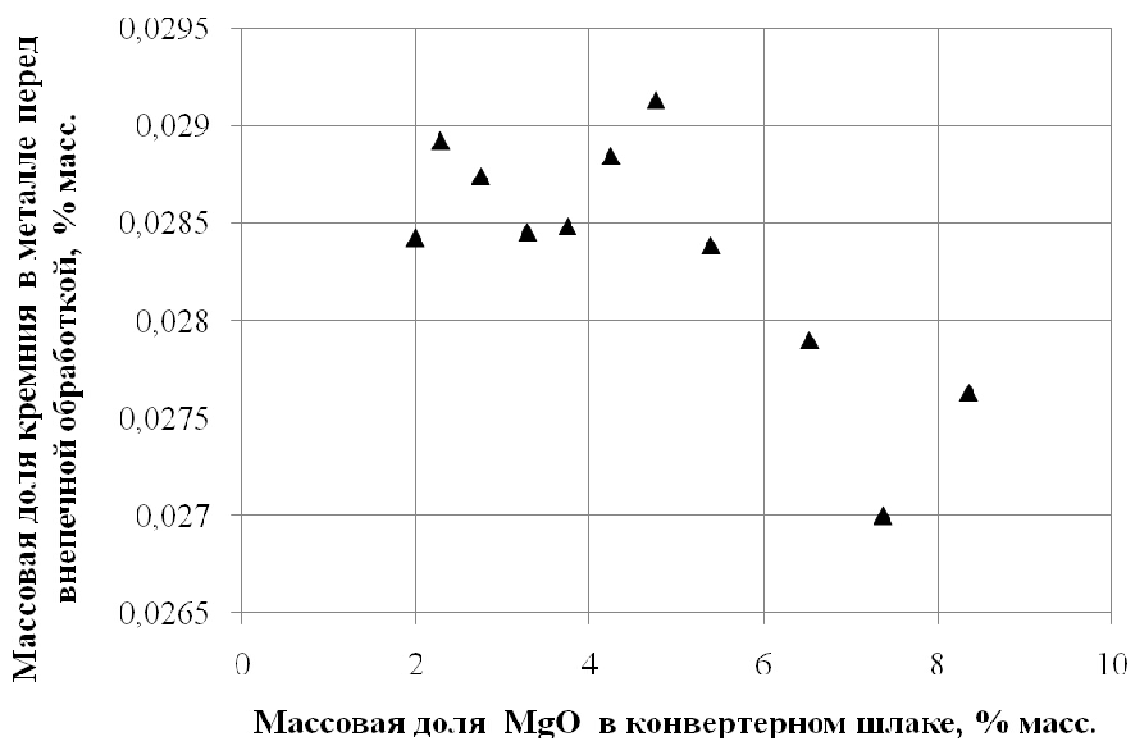


Рис. 7 – Влияние массовой доли оксида магния в конвертерном шлаке на величину массовой доли кремния в металле перед началом доводки (осреднённые данные)

Эксперименты по совершенствованию шлакового режима внепечной обработки показали, что при выплавке низкокремнистых марок стали с внепечной обработкой без использования установки ковш-печь рациональные пределы варьирования массовой доли оксида магния в ковшевом шлаке – 6-8 % масс.

Выводы

1. Проведены исследования изменения окисленности металла в кислородном конвертере при выплавке различных марок стали, а также в ковше на плавках малоуглеродистой стали, раскисленной алюминием, проанализированы факторы, влияющие на величину активности кислорода в сталеплавильном агрегате перед выпуском и в ковше.
2. Выполнена настройка Celox для определения содержания углерода в металле применительно к условиям выпуска низкоуглеродистых марок стали из сталеплавильного агрегата. Показано, что использование Celox для контроля содержания углерода целесообразно для условий, когда величину окисленности определяет содержание углерода.
3. Подготовлены и опробованы рекомендации по нормированию расхода алюминийсодержащих материалов для раскисления малоуглеродистых марок стали. Показано влияние предварительного раскисления стали на выпуске углеродсодержащими материалами на степень усвоения алюминия и его удельный расход.
4. По мере снижения отношения $[Mn]:[S]$ отмечен рост уровня отсортровки листового проката по дефектам «рваная кромка» (мартеновская сталь) или «надрыв» (конвертерная сталь).
5. Контроль активности кислорода в стали по ходу внепечной обработки показал, что равновесная активность оксида алюминия в неметаллических включениях близка к 1. Однако при этом массовая доля кремния в металле несколько ниже равновесной со шлаком, но меняется в соответствии с массовыми долями кремнезёма в шлаке и кислоторастворимого алюминия в металле.
6. При выплавке низкокремнистых марок стали с внепечной обработкой без использования установки ковш-печь рациональные пределы варьирования массовой доли оксида магния в ковшевом шлаке – 6-8 % масс.

Список использованных источников:

1. Lifeng Zhang. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness / Lifeng Zhang, Brian G. Thoma // ISIJ International – 2003. – V. 43. – № 3. – P. 271-291.
2. Reduction of Slivers due to Non-Metallic Inclusion in Continuous Casting / V. Sanam, P.K. Patra, S. Siddabathula, R. Das, V. Usharani // Materials Science & Technology 2009. October 25-29, 2009: Pittsburgh, PA. – AIST Steel Properties & Applications Conference Proceedings. – 2009. – P. 235-246.
3. Раскисление малоуглеродистой конвертерной стали / В.А. Шеремет [и др.] // Сталь. – 2006. – № 4. – С. 23-25.
4. Башлий Ф.И. Межфазное распределение углерода присадки для предварительного раскисления плавки / Ф.И. Башлий, А.В. Сыстеров // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2007. – № 11. – С. 29-31.
5. Оптимизация технологии производства автолистовой стали 08Ю на базе физико-химических принципов ковшовой обработки металла / А.И. Зайцев [и др.] // Металлург. – 2007. – № 8. – С. 58-65.
6. Andersson M.A. Thermodynamic and Kinetic Model of Reoxidation and Desulphurisation in the Ladle Furnace / M.A. Andersson, L. Jonsson, Pär G. Jönsson // ISIJ International. – 2000. – V. 40. – № 11. – P. 1080-1088.
7. Ohta H. Activities of SiO_2 and Al_2O_3 and activity coefficients of FeO and MnO in $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ slags / H. Ohta, H. Suito // Metallurgical and Materials Transactions B. – 1998. – № 29B. – P. 119-129.
8. Kang Y. Activities of SiO_2 in Some $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ($-10\%\text{MgO}$) Melts with Low SiO_2 Contents at 1873 K / Y. Kang, Du Sichen, K. Morita // ISIJ International. – 2007. – V. 47. – № 6. – P. 805-810.

Bibliography:

1. Lifeng Zhang. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness / Lifeng Zhang, Brian G. Thoma // ISIJ International – 2003. – V. 43. – № 3. – P. 271-291.
2. Reduction of Slivers due to Non-Metallic Inclusion in Continuous Casting / V. Sanam, P.K. Patra, S. Siddabathula, R. Das, V. Usharani // Materials Science & Technology 2009. October 25-29, 2009: Pittsburgh, PA. – AIST Steel Properties & Applications Conference Proceedings. – 2009. – P. 235-246.
3. Desoxydating of low-carbon converter steel / V.A. Sheremet [and other] // Steel. – 2006. – № 4. – P. 23-25. (Rus.)
4. Bashliy F.I. Interphase distributing of the carbon additive for the predeoxydating of melting / F.I. Bashliy, A.V. Systеров // Izvestiya VUZ. Chernaya Metallurgiya. – 2007. – № 11. – P. 29-31. (Rus.)
5. Optimization of the technology production of autosheet steel 08Ю on the base of physical and chemical principles of ladle treatment of metal. / A.I. Zaitsev [and other] // Metallurg. – 2007. – № 8. – С. 58-65. (Rus.)
6. Andersson M.A. Thermodynamic and Kinetic Model of Reoxidation and Desulphurisation in the Ladle Furnace / M.A. Andersson, L. Jonsson, Pär G. Jönsson // ISIJ International. – 2000. – V. 40. – № 11. – P. 1080-1088.
7. Ohta H. Activities of SiO_2 and Al_2O_3 and activity coefficients of FeO and MnO in $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ slags / H. Ohta, H. Suito // Metallurgical and Materials Transactions B. – 1998. – № 29B. – P. 119-129.
8. Kang Y. Activities of SiO_2 in Some $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ($-10\%\text{MgO}$) Melts with Low SiO_2 Contents at 1873 K / Y. Kang, Du Sichen, K. Morita // ISIJ International. – 2007. – V. 47. – № 6. – P. 805-810.

Рецензент: А.М. Скребцов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила: 28.04.2015